

УДК 536:621.9

**А.В. Усов,**д-р технич. наук, проф.,  
Одеський національний  
політехнічний  
університет  
usov-a-v@mbei.opu.ua

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИН ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ШЛИФОВАНИИ МАТЕРИАЛОВ И СПЛАВОВ, СКЛОННЫХ К ЭТОМУ ВИДУ ДЕФЕКТОВ.

*А.В. Усов. Исследование причин трещинообразования при шлифовании материалов и сплавов, склонных к этому виду дефектов. В статье показано, что для бездефектного шлифования деталей, имеющих в поверхностном слое, дефекты и включения, при выборе режимов обработки и характеристик инструмента следует руководствоваться предельными значениями теплового потока, чтобы наследственные дефекты не вышли из равновесного состояния.*

*A.V. Usov. Research of reasons of formation of cracks at polishing of materials and alloys, apt to this type of defects. In the article the analysis of reasons of is presented at polishing of materials and alloys, apt to this type of defects. It is shown that intensity of tpe-цинообразования is in a great deal determined by the presence of different sort of неоднородностей arising up in a superficial layer on motion technology of making of detail*

**Введение.** Отличительной особенностью операции шлифования является выделение большого количестве теплоты, основная часть которой воспринимается обрабатываемой деталью и вызывает на отдельных её участках структурные изменения - прижоги. Эти дефекты способствуют уменьшению исходной твёрдости поверхности, образованию растягивающих остаточных напряжений, снижают контактную выносливость, усталостную прочность деталей [1,2,3 ].

Для большой группы металлов и сплавов не подверженных структурным превращениям в процессе обработки их шлифованием характерным видом брака являются дефекты типа трещин, существенно снижающие эксплуатационные свойства изделий.

Выделяют следующие типы трещин при шлифовании материалов, предрасположенных к такому виду дефектов [4]:

- сетка поверхностных трещин, залегающих на относительно небольшую глубину /до 0,5 мм - 1,5 мм/;

- магистральные глубинные трещины / 1-10 мм/,
- подповерхностные замкнутые трещины;
- пограничные трещины, формирующиеся при обработке кусочно-однородных материалов / детали с покрытиями/.

Характер и интенсивность трещинообразования во многом определяется теплофизическими свойствами обрабатываемых материалов, их структурой, наследственностью предыдущих технологических операций, режимами шлифования, а также характеристиками применяемых кругов. При эксплуатации деталей, поверхностный слой которых содержит шлифовочные трещины, разрушение изделий происходит по местам их скопления.

Шлифовочные дефекты на обработанных поверхностях деталей резко снижают /иногда до 30 раз/ их эксплуатационные показатели и являются недопустимыми.

Поэтому задача определения технологических условий бездефектного шлифования и управления качеством поверхностного слоя изделий., из материалов склонных к трещино- и сколообразованию является весьма актуальной. Это предопределяет необходимость изучения механизма формирования шлифовочных дефектов.

**Материал и результаты исследования.** Качество поверхностного слоя формируется под действием термомеханических явлений, сопровождающих финишные операции. Поэтому в фундаментальных работах Якимова А.В., в качестве основного показателя физико-механического состояния обрабатываемых поверхностей используется теплонапряженность алмазно-абразивной обработки. На основании разработанных им моделей температурных полей изучаются закономерности образования дефектов типа прижогов и технологические возможности их устранения в зависимости от теплофизических свойств обрабатываемых материалов, режимов шлифования, конструкции и характеристик применяемых инструментов.

Однако, имеющиеся в настоящее время модели тепловых процессов алмазно-абразивной обработки получены в предположении однородности шлифуемых материалов и не учитывают наличие дефектов технологической наследственности изделий. Изучению причин образования шлифовочных дефектов-трещин - посвящены работы Якимова А.В., Михайлова Л.А., Подзея А.В., Ящерицына П.И., Рыжова И.В. и др. в которых напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя детали рассматривается, в основном, с качественной стороны или оценивается в каждом отдельном случае экспериментальными методами. Так, предрасположенность магнитных сплавов к трещинообразованию при обработке их шлифованием многие исследователи связывают с особенностями их магнит-

ной и кристаллической структуры, предназначенной для получения высоких магнитных свойств. Отсутствие каких-либо количественных связей трещиностойкости магнитов с другими свойствами не позволяет однозначно пользоваться имеющимися рекомендациями по бездефектной обработке шлифованием. Имеются исследования влияния структурных превращений и сталей на образование шлифовочных трещин, согласно которым наличие большого количества аустенита, в подповерхностном слое деталей приводит к образованию растягивающих напряжений, которые реализуются в виде хрупких трещин.

Структурные превращения не могут быть "самостоятельной" причиной возникновения шлифовочных трещин, так как структурные напряжения, достигающие разрушающих значений, формируются на протяжении значительного промежутка времени. Шлифование характеризуется кратковременностью, большими скоростями нагрева и охлаждения, при которых структурные изменения незначительны, в термомеханические напряжения достигают предельных значений.

Механизм образования трещин в поверхностном слое деталей с покрытиями объясняют действием временных растягивающих температурных напряжений, превышающих предельные значения, а отслаивание покрытия от основного металла – действием остаточных напряжений в поверхностном слое. Рассматриваемые при этом модели напряженно-деформированного состояния деталей с покрытиями учитывают кусочную неоднородность /покрытие-матрица/ и полностью отсутствуют исследования влияния неоднородности самого покрытия на механизм дефектообразования [5].

Феноменологический подход в изучении причин трещинообразования материалов склонных к этому виду дефектов не позволяет вскрыть механизм зарождения и развития шлифовочных трещин.

Интенсивность появления трещин во многом определяется наличием различного рода неоднородностей, возникающих в поверхностном слое по ходу технологии изготовления детали. Особенно опасными с точки зрения зарождения трещин, являются такие наследственные дефекты, как флокены, остроконечные полости, инородные включения. Поэтому построение теории трещинообразования при шлифовании с использованием критериев механики разрушения, возможно лишь на основе углубленного изучения механизма зарождения трещин в вершинах концентраторов, которыми являются металлургические, структурные и технологические дефекты.

Для управления качеством детали при шлифовании необходимо изучить закономерности формирования термомеханического состояния поверхностного слоя с учётом его неоднородности. Высокопроизводительное бездефектное шлифование материалов, чувствительных к трещинооб-

разованию, необходимо осуществлять с учетом наследственных дефектов на предельных режимах, при сохранении равновесного состояния, ещё не вызывающих образование трещин. До настоящего времени не имеется данных для разработки соответствующих рекомендаций.

При постановке задачи о повышении качества шлифования деталей возникает проблема оценки влияния неоднородностей, выбора режимов и характеристик инструмента, смазочно охлаждающей среды использование которых исключает прижоги- и трещинообразование на обрабатываемых поверхностях. Широкая номенклатура материалов, подверженных трещинообразованию, многообразие их свойств, размеры, ориентация, размещение и распределение наследственных дефектов способствовали тому, что имеющиеся в настоящее время рекомендации по устранению шлифовочных трещин при обработке поверхностей изделий не могут быть общепринятыми. В связи с этим необходимо разработать предпосылки для оптимизации термомеханического состояния поверхностного слоя с учетом его дефектности, исключаящие возникновение шлифовочных дефектов типа трещин и прижогов.

Решение указанных задач позволяет не только изучать прямую технологическую задачу финишной обработки - обеспечение бездефектного шлифования материалов, предрасположенных к трещино- и прижогообразованию, но и перейти к технологии изготовления материалов "малочувствительных" к указанным дефектам за счет технологической наследственности, формирующей структуру, физико-механических свойств поверхностного слоя, начиная от способов получения заготовок и заканчивая чистовым алмазно-абразивным шлифованием.

При выборе и обосновании математической модели учитывалось, что процесс шлифования деталей сопровождается как тепловыми, так и механическими явлениями. Однако преобладающее воздействие на напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя оказывают температурные поля. Учитывая то, что основная масса поверхностного слоя металла при шлифовании находится в упругом состоянии, можно воспользоваться моделью термоупругого тела, отражающей взаимосвязь механических и тепловых явлений при конечных значениях тепловых потоков. Так как для исследований термомеханического состояния шлифованных поверхностей важной является информация о распространении температур и напряжений по глубине и в направлении движения инструмента, то рассматривается плоская задача.

Анализ масштабных схем взаимодействия круга с обрабатываемой поверхностью показывает, что кривизна круга и детали в пределах зоны контакта несущественно влияет на геометрическую схему взаимодействия круга с деталью. Поэтому при составлении расчетной схемы (рис.1) до-

пускается, что деталь типа заготовок может быть представлена в виде кусочно-однородных условных слоев, с разными свойствами, расположенных на основном материале-матрице, что позволяет изучать термомеханические процессы при шлифовании деталей с несколькими типами покрытий, толщиной  $\Delta a_k$  наносимых на основной материал. Такая схема предопределяет тепловые и деформационные условия сопряжения слоев по границам их раздела -  $a_k$ .

Влияние неоднородностей в виде фазовых превращений неустойчивых структур, межзеренных плёнок, границ кон тура наследственных аустенитных зёрен, карбидной строчечности, неметаллических включений, раковин, флокенов и др. дефектов, возникающих в поверхностном слое по ходу технологического процесса, учитывается в модели наличием в поверхностном слое включений и дефектов в виде условных трещин (рис.1).

Система уравнений, определяющих тепловое и напряженно-деформированное состояние при шлифовании поверхности деталей с покрытиями, верхний слой которых имеет неоднородности типа включений и микротрещин, содержит [6, 7]:

Уравнение нестационарной теплопроводности

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a^2 \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad \begin{matrix} 0 \leq x < \infty; \\ -\infty < y < \infty. \end{matrix} \quad (1)$$

Уравнение упругости Ламе в перемещениях

$$\frac{\partial \Theta}{\partial x} \frac{1}{1-2\mu} + \Delta \bar{v} = B^T \frac{\partial T}{\partial x}; \quad \bar{v}(x, y) = \frac{v}{2G}; \quad \bar{v}(x, y) = \frac{v}{2G}; \quad (2)$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial x} \frac{1}{1-2\mu} + \Delta \bar{v} = B^T \frac{\partial T}{\partial y}; \quad B^T = \frac{4G(1+\mu)}{1-2\mu} a_k; \quad \Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \quad (3)$$

где:  $(x, y, \tau)$  - температура в точке с координатами  $(x, y)$  и в любой момент времени  $\tau$ ;  $a$  - температуропроводность материала;  $a_i$  - температурный коэффициент линейного расширения;  $\mu, G$  - постоянные Ламе;  $v, v$  - компоненты вектора перемещений точки  $(x, y)$ ;  $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$  - оператор Лапласа.



рабатываемой поверхностью;  $\gamma$  - коэффициент теплообмена с окружающей средой;  $\sigma_x, \tau_{xy}$  - нормальные и касательные напряжения.

Условия сопряжения слоёв (покрытий):

для температурных полей	для деформационных полей
$T(a_k - 0, y, \tau) = T(a_k + 0, y, \tau)$	$v_j(a_k - 0, y) = v_j(a_k + 0, y)$
$\lambda_{k-q} \frac{\partial T}{\partial x}(a_k - 0, y, \tau) = \lambda_k \frac{\partial T}{\partial x}(a_k + 0, y, \tau)$	$\sigma_x(a_k - 0, y) = \sigma_x(a_k + 0, y);$ (7)
	$\tau_{xy}(a_k - 0, y) = \tau_{xy}(a_k + 0, y)$

где  $\lambda_k$  - теплопроводность  $k$ -го слоя;  $\alpha_k$  - толщина  $k$ -го слоя;  $v_j^k$  - компоненты перемещений в  $k$ -ом слое.

Для поверхностных слоёв, имеющих структурные и технологические неоднородности, условия разрывности решения в зависимости от типа дефекта будут:

на включениях

$$\langle \bar{v} \rangle = 0, \langle \sigma_x \rangle \neq 0$$

$$\langle \bar{v} \rangle = 0, \langle \tau_{xy} \rangle \neq 0$$

на трещиноподобных дефектах

$$\langle \sigma_x \rangle = 0, \langle \bar{v} \rangle \neq 0$$

$$\langle \tau_{xy} \rangle = 0, \langle \bar{v} \rangle \neq 0$$

где  $\langle \bar{v} \rangle, \langle \bar{v} \rangle, \langle \sigma_x \rangle, \langle \tau_{xy} \rangle$  - скачки компоненты смещений и напряжений.

Предельно равновесное состояние деформируемого поверхностного слоя оценивалось классическими критериями прочности.

Из имеющихся критериев разрушения, учитывающих локальные физико-механические свойства неоднородных материалов, наиболее приемлемыми для данного случая являются критерии силового подхода, связанные с использованием понятия коэффициента интенсивности напряжений /КИН/. Когда нагружение приводит к тому, что интенсивность напряжений  $K_I$  становится равной предельному значению  $K_{Ic}$ , то трещиноподобный дефект превращается в магистральную трещину.

Моделирование влияния исходной кусочной однородности шлифуемых материалов /деталей с покрытиями/ на термомеханические процессы осуществляется методом разрывных решений [8], Под ними понимаются такие решения, которые удовлетворяют уравнениям теплопроводности Фурье и упругости Ламе всюду, кроме границ дефектов. При переходе через границу поля смещений и напряжений терпят разрывы I рода, т.е. появляются их скачки  $\langle v \rangle, \langle v \rangle, \langle \sigma_x \rangle, \langle \tau_{xy} \rangle$ .

Решение тепловой задачи (1)-(4),(5) – (8) осуществляется с помощью интегральных преобразований Фурье по переменной  $y$  и Лапласа по  $\tau$  к функции  $T/x, y, \tau/$  в I ( $k=0$ ) слое, которые описываются в интегральной форме в виде:

$$T_0(x, y, \tau) = \int_{-a}^a d\tau \int_0^\tau \chi(t - \tau, x, y - \eta) dt, \quad (9)$$

где  $q(t, x, y - \eta) = \frac{1}{2\pi i} \int_r K_p^m(y - \eta, x) e^{pt} dp$ ,  $\chi(y, \tau) = \sum_{m=0}^{\infty} \chi_m(y) 2e^{-\tau} L_m(2\tau)$

$L_m(2\tau)$  - полиномы Лаггера;  $K_p^m(y - \eta) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{-t\beta(y-\eta)}}{l_{m,\beta p}} l_{m,\beta p} -$  ВЫ-

ражение, учитывающее теплофизические свойства слоёв  $/k = 0 - m/$ , их толщину и граничные условия.

Напряженно-деформированное состояние слоистой полуплоскости также оценивается методом разрывных решений. Границы раздела  $x = a_k (k = 0)$  рассматриваются как дефекты, при переходе через которые терпят разрывы поля смещений и напряжений.

Построение разрывных решений уравнений Ламе с заданными скачками осуществляется с помощью функций Треффца:

$$\bar{v} = \psi_1 + (x - a)\psi'_0, \bar{v} = \psi_2 + (x - a)\psi'_0; \psi'_0 = \frac{\psi'_1 + \psi'_2}{3 - 4\eta}, e = \psi'_1 + \psi''_2 + \psi'_0, \quad (10)$$

где:  $\Delta\psi_0(x, y) = 0, \Delta\psi_j(x, y) = b_k^t T^{(j)}, (j = 1, 2)$  “ $\bar{\cdot}$ ”  $\frac{\partial}{\partial x}$ , “ $\cdot$ ”  $\frac{\partial}{\partial y}$

Напряжения находят по формулам:

$$\sigma_x = (1 - \mu)\psi'_0 + \psi'_1 + (x - a_k)\psi''_0; \sigma_y = -\mu\psi'_0 + \psi'_2 + (x - a_k)\psi''_0 \quad (11)$$

$$\tau_{xy} = \psi_1^2 + 2(x - a_k)\psi'_0 + \psi'_2 + \psi_0'$$

Применение обобщенных преобразований Фурье по переменным  $x, y$  к уравнениям (2),(3),(6),(7) с учетом [8] позволяет получить рекуррентные соотношения, связывающие смещения и направления в  $k$ -м слое с напряжениями и смещениями, формирующимися в первом слое под действием нестационарных температурных полей.

Влияние неоднородностей в поверхностном слое сталей и сплавов на интенсивность трещино- и сколообразования при шлифовании исследуется следующим образом. В условиях неравномерного нагрева в поверхностном слое возникают тепловые деформации, которые вызывают температурные напряжения. Под действием этих напряжений, концентрирующихся в местах расположения дефектов, и происходит образование шлифо-



вочных трещин. Математически задача формулируется так. Пусть в упругой полуплоскости на линиях  $\tilde{x}_i = 0$  имеются дефекты  $\left| \tilde{y}_i \right| \leq l_i, (i = \overline{1, k})$  при переходе через которые терпят разрывы поля смещений и напряжений:

$$\left\langle \tilde{v}(\tilde{y}) \right\rangle = \tilde{v}_k(-0, \tilde{y}) - \tilde{v}_k(+0, \tilde{y}); \quad \left\langle \sigma_x^k(\tilde{y}) \right\rangle = \sigma_x^k(-0, \tilde{y}) - \sigma_x^k(+0, \tilde{y}); \quad (12)$$

$$\left\langle \tilde{v}(\tilde{y}) \right\rangle = \tilde{u}_k(-0, \tilde{y}) - \tilde{u}_k(+0, \tilde{y}); \quad \left\langle \tau_{xy}^k(\tilde{y}) \right\rangle = \tau_{xy}^k(-0, \tilde{y}) - \tau_{xy}^k(+0, \tilde{y});$$

В зависимости от типа дефектов реализуются граничные условия (8) первого типа, либо второго. Будем различать левый /находящийся при движении по  $l_i$  в положительном направлении/ и правый берега дефектов, обозначая относящиеся к ним величины индексами “+” и “-“. Решение задачи термоупругости (2),(3),(6),(8) для поверхностного слоя, содержащего указанные дефекты при условии, что температурное поле описывается выражением (9) сводится к решению системы сингулярных интегральных уравнений относительно скачков смещений  $\left\langle \tilde{u}'_k(\tilde{y}) \right\rangle, \left\langle \tilde{v}'_x(\tilde{y}) \right\rangle$  - в случае

трещин, и скачков напряжений  $\left\langle \sigma_x^k(\tilde{y}) \right\rangle, \left\langle \tau_{xy}^k(\tilde{y}) \right\rangle$  в случае включений:

$$\int_{-l_i}^{l_i} \frac{\left\langle \tilde{u}'_1(\eta) \right\rangle}{y - \eta} d\eta + \sum_{k=1}^S \int_{-l_k}^{l_k} \left[ \left\langle \tilde{u}'_1(\eta) \right\rangle K_k^{(1)}(d, y - \eta) + \left\langle \tilde{v}'_1(\eta) \right\rangle M_k^{(1)}(d, y - \eta) \right] d\eta = F_1; \quad (13)$$

В этих формулярах приняты следующие обозначения:  $K_k^{(i)}(d, y - \eta); M_k^{(i)}(d, y - \eta)$  - ядра, отражающие размещение и ориентацию дефектов, относительно глобальных координат XOY;  $d^*$  - параметр, характеризующий физико-механические свойства материала поверхностного слоя.

Вычисление регулярных интегралов в (13) производятся по квадратурным формулам Гаусса-Чебышева, а сингулярных интегралов с ядрами Коши – методом ортогональных многочленов [8]. При этом получаем систему алгебраических уравнений относительно неизвестных коэффициентов. Окончательно, находим напряжения и смещения в поверхностном слое с

дефектами  $l_k$  по формулам:  $\left\| \sigma_x, \tau_{xy}, u', v' \right\| = \sum_{k=1}^n \int_{-l_k}^{l_k} \left\| R_k^{(m)}[(x - \xi), y] \right\| P^{(i)}(\xi) d\xi,$

$$R_k^m(x, y) = -(\alpha_k)^m v_k^{(m)} \left[ K_n^{(S_k - m)} \right], m = 0, 1,$$

$$K_n^{(0)}(x, y) = \frac{(-sqny)^n |y|}{4\pi(x^2 + y^2)} \left[ \frac{y^2 - x^2}{y^2 + x^2} - (n-1) \right], n = 0, 1, 2, \dots$$

$$K_n^{(1)}(x, y) = \frac{(-sqny)^n x}{4\pi(x^2 + y^2)} \left[ \frac{2y^2}{x^2 + y^2} - (n-1) \right] \quad (14)$$

Наибольший интерес представляет поведение напряжений в орестности вершин дефектов типа трещин, остроконечных включений, структурных несовершенств, т.е. особенностей напряжений при  $y \rightarrow \pm l_k$ . Характер поля напряжений в непосредственной близости от конца дефекта, полученного в рамках классической теории упругости, определяется коэффициентами интенсивности напряжений  $K_I = iK_{II}$ .

Так, исследование интенсивности напряжений в вершинах дефекта длиной  $2l$ , расположенного на глубине  $\sigma^*$ , когда на поверхности тела  $|x=0, |y| \leq a^* l$  задан тепловой поток  $q$ , позволило установить предельное значение этого потока  $q^*$  при котором указанный дефект начинает развиваться в магистральную трещину:

$$q^* = \frac{2\sqrt{3}\lambda(1-\nu)K_{4C}}{\alpha_2 E l \sqrt{\pi} \sigma^*}. \quad (15)$$

Взаимное влияние дефектов на интенсивность напряжений, сказывается при расположении их на расстоянии друг от друга не более  $\sigma^* = \frac{1}{3}$ . При этом наименьшая трещиностойкость материала достигается если дефекты ориентированы относительно друг друга под углом  $\varphi = \frac{\pi}{6} + \frac{\pi}{4}$ .

Геометрия и свойства включений могут создавать условия как для торможения, так и для развития шлифовочных трещин. Если тепловой поток направлен параллельно большей оси эллиптического включения и прямолинейной термоизолированной трещине, то при коэффициенте линейного температурного расширения  $\alpha_i^B$  включения больше, чем основного материала  $\alpha_i^M / \alpha_i^B > \alpha_i^M / \alpha_i^B$ , увеличение жесткости включения приводит к возрастанию  $K_I$  для различных отношений коэффициентов теплопроводности, составляющих материала.

Это приводит к снижению трещиностойкости поверхностного слоя. Для дефектов типа трещин, находящихся в слое с меньшим коэффициентом  $\alpha_i$ , ориентация дефекта сильно влияет на величину КИН.

При значительном удалении трещины, расположенной в более жестком слое от линии раздела КИН  $K_I$  принимает максимальные значения, когда дефект ориентирован параллельно этой линии, а с приближением трещины к границе раздела максимум  $K_I$  достигается, когда она становится перпендикулярной данной границе. Если же трещина находится в менее жестком материале, то максимум  $K_I$  достигается, когда трещина перпендикулярна линии раздела. Коэффициент  $K_{II}$  становится максимальным при углах между линией раздела слоёв, близких к  $\frac{\pi}{6}$ , независимо от относительной жесткости слоёв.

Для бездефектной обработки сталей и сплавов, имеющих трещиноподобные дефекты и включения, при выборе режимов обработки и характеристик инструмента следует руководствоваться предельными значениями теплового потока [8,9], формирующегося при шлифовании, чтобы наследственные дефекты не вышли из равновесного состояния.

В действительности, поверхностный слой шлифуемых материалов содержит неоднородности и дефектность наследственного происхождения, обладающие той или иной степенью случайности. Особенно существенна стохастичность микрон неоднородностей в сплавах ЮНДК Т, цементируемых сталях, различного рода покрытиях [10]. Поэтому при исследовании причин появления шлифовочных трещин, кроме детерминированного, необходим вероятностно-статистический подход.

Из установленных функциональных связей между кинетикой термомеханических явлений, наследственной неоднородностью поверхностного слоя и показателями качества шлифуемых изделий следует, что тепловой поток является основным критерием предельного равновесия трещиноподобных дефектов [10].

Влияние конструктивных параметров инструмента на термомеханическое состояние поверхностного слоя определялось с помощью модельной задачи (1), (4), и граничных условий в виде:

$$q(y, \tau) = \frac{c\sqrt{\tau}}{\lambda} [H(y) - H(y - 2a^*)] \sum_{k=0}^n \sigma(y + kl - v_{kp}\tau) \quad (16)$$

где  $H(y)$  - функция Хевисайда;  $\sigma(y)$  - дельта-функция Дирака;  $n$  - количество зерен, проходящих в зоне контакта за время  $\tau = \frac{\sqrt{\pi t_{ин}}}{v_{kp}}$ ;  $\lambda$  - теплопроводность материала изделия;  $c\sqrt{\tau}$  - тепловой поток от единичного зерна;  $v_g, v_{kp}, t_{ин}$  режимы шлифования,  $2a^*$  - длина дуги контакта

круга с деталью;  $l^*$  - расстояние между режущими зернами. Получены теоретически и подтверждены экспериментально максимальные значения мгновенной температуры  $T_M$ , от единичных зерен к постоянной составляющей  $-T_K$ , которые использованы в дальнейшем в качестве критериев при прогнозировании условий образования дефектов типа прижогов и глубины их залегания.

Апробация теоретических результатов по обеспечению качества шлифуемых поверхностей, содержащих неоднородности проводилась на материалах, склонных к трещинообразованию и существенно отличающихся между собой физико-механическими свойствами - это изделия с покрытиями, магнитотвердые сплавы и высокопрочные стали.

Широко применяемые в машиностроении покрытия рабочих поверхностей деталей - молибденовые, плазменные, боридные - характеризуются очень высокой твердостью и хрупкостью. При обработке этих покрытий шлифованием самыми распространенными дефектами являются трещины, сколы, срывы [11].

Существующие модели напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя деталей с покрытием являются не полными, в связи с принятием при их построении таких допущений как гипотеза об однородности самого покрытия [12]. Поэтому в известных функциональных связях технологических параметров с термомеханическими процессами в поверхностном слое деталей с покрытиями и разработанных на базе их рекомендаций по устранению шлифовочных трещин не учтены структурные особенности покрытий. В то время, как анализ изломов деталей с покрытиями показывает, что местами зарождения трещин являются микрон неоднородности покрытий, обусловленные как характером самих покрытий, так и технологией их нанесения.

Изучение роли неоднородности структуры покрытий в механизме снижения трещиностойкости проводилось с помощью установленного теоретическим путем критерия локального разрушения в виде следующего неравенства:

$$l_0 < \frac{Da\lambda^2 v_q^u K_c^2}{\pi^2 \left[ c v_{kp} G(1+\nu) a_t \left( 1 - 2\chi p \left( \frac{v_q \sqrt{Dt}}{a\tau} \right) \right) \right]}, \quad (17)$$

где  $v_{kp}, v_q, t$  режимы шлифования;  $D, C$  - параметры инструмента;  $\lambda, a$  - теплофизические характеристики обрабатываемого покрытия;  $K_c$  - трещиностойкость данного покрытия;  $G$  - модуль упругости;  $\nu$  - коэффициент Пуассона;  $a_t$  - температурный коэффициент линейного расширения;  $l$

- характерный линейный размер структурного параметра (дефект структуры).

Для плазменных покрытий на основе карбид титана  $TiC$  в качестве параметра  $l$  выбирались размеры воздушных пор, величина которых регулируется скоростью транспортирующей струи.

Исследование влияния технологической наследственности на процесс трещинообразования при шлифовании магнитотвердых сплавов проводилось на основе полученных критериев, отражающих особенности метода плавки, режимов ТО, ТМО и формирующейся при этом морфологии самих сплавов.

Анализ структуры технологического процесса изготовления магнитов является важным этапом в выявлении резервов повышения выхода годных магнитов на операции окончательного шлифования, так как основные дефекты - трещино - и сколообразования возникают именно при окончательной обработке данных магнитов.

Количественные оценки трещиностойкости магнитотвердых сплавов проводились в зависимости от способов получения заготовок и последующей их термообработки на  $\gamma$  - фазу, термомагнитной обработки на  $a + a'$  фазу при различных режимах отпуска и скорости охлаждения. Контролируемыми параметрами при этом были значения напряжений изгиба  $\sigma_{из}$ , растяжения  $\sigma_p$ , коэффициента  $K_{lc}$  и характеристики магнитных свойств - коэрцитивная сила материала по намагниченности  $h_c$  и остаточная индукция  $B_r$ . Экспериментальные данные свидетельствуют, что значения  $K_{lc}$  - различны для моно- и поликристаллов ЮНДКТ в стадии заготовки. Это объясняется тем, что процентное содержание неметаллических включений в сплавах, полученных различными способами изменяется в широких пределах. Фазовый состав данных сплавов также изменяет значение коэффициента  $K_{lc}$ . Так для поликристаллов в исходном состоянии  $K_{lc} = 30$  МПа м, в то время, как наличие  $\gamma$  - фазы повышает  $K_{lc}$  до 97 МПа м. Установлено, что  $\gamma$ - фаза, являясь более пластичной, по сравнению с основной матрицей данного сплава, способствует торможению микротрещин. Фрактографический анализ изломов в состоянии  $\gamma$  - фазы показывает, что зона разрушения носит интеркристалльный характер с выраженными линиями скольжения. Однако, наличие этой фазы в сплаве ЮНДК Т снижает коэрцитивную силу на 40%, остаточную магнитную индукцию - на 15-20% и максимальную магнитную энергию более, чем на 60%. Поэтому эти сплавы подвергаются в дальнейшем термомагнитной обработке. Особенностью структуры высококоэрцитивного состояния рассматриваемых спла-

вов является периодическое чередование эллиптически образных частиц  $\alpha'$  - фазы, окруженных матрицей  $\alpha$  - фазы. Последующая обработка данных сплавов шлифованием вызывает формирование дефектов типа трещин в поверхностном слое. Причем, интенсивность трещинообразования связана с режимами термообработки, которые в свою очередь, влияют на размеры частиц  $\alpha'$  - фазы и направление ТМО по отношению к продольной подаче при шлифовании. Доминирующими технологическими параметрами, влияющими на трещиностойкость и контактную температуру являются глубина шлифования и характеристики круга. Так в случае шлифования с различной глубиной алмазными кругами трещиностойкость измеряется незначительно, в отличие от диапазона изменения  $K_{Ic}$  при обработке кругами 24A25CM18K5.

На основе построенной модели изучен механизм возникновения шлифовочных трещин с позиций влияния геометрии и физических свойств  $\alpha'$  - фазы и ее ориентации по отношению к направлению шлифования данных магнитов в высококоэрцитивном состоянии. При этом использованы, также, условия (19) равновесия структурных составляющих  $\alpha'$  - фазы в зависимости от доминирующих факторов процесса шлифования и вязкости разрушения  $K_{Ic}$ , магнита, выполнение которых не приводит к возникновению трещин на обрабатываемой поверхности.

Разработка технологических критериев для управления процессом бездефектного шлифования осуществлена на базе установленных функциональных связей между физико-механическими свойствами обрабатываемых материалов и основными технологическими параметрами.

Качество обрабатываемых поверхностей будет обеспечено, если с помощью управляющих технологических параметров подобрать такие режимы обработки, смазочно-охлаждающие среды и характеристики инструмента, что текущие значения температуры шлифования  $T(x, y, \tau)$  и теплового потока  $q(y, \tau)$ , напряжений  $\sigma(M)$  и сил шлифования  $P_y, P_z$  коэффициента  $K_{Ic}$  будут превосходить своих предельных значений /12/.

Реализация системы ограничивающих неравенств по величинам самой температуры и глубине её распространения в виде:

$$T(x, y, \tau) = \frac{C}{2\pi\lambda} \sum_{k=0}^n H\left(\tau - \frac{kl}{v_{kp}}\right) H\left(\frac{L+kl}{v_{kp}}\right) \int_{\gamma_1}^{\gamma_2} f(x, y, \tau, \tau') d\tau' \leq [T]_M \quad (18)$$

$$T([h], 0, \tau) = \frac{C}{2\pi\lambda} \sum_{k=0}^n H\left(\tau - \frac{kl}{v_{kp}}\right) H\left(\frac{L+kl}{v_{kp}}\right) \int_{\gamma_1}^{\gamma_2} \psi(x, \tau, \tau') d\tau' \leq [T]_{\bar{n}, \bar{i}}.$$

$$T_k(0, y, \tau) = \frac{Cv_{kp}}{\pi\lambda\sqrt{v_g}} \int_a^\tau \int_{-e}^e \chi(\eta, t) e^{\frac{(y-\eta)^2}{4(\tau-t)}} \left\{ \frac{1}{\sqrt{\pi(\tau-t)}} + \chi e^{\gamma^2(\tau-t)} [1 + \Phi(\gamma\sqrt{\tau-t})] \right\} d\eta dt \leq [T] \quad (20)$$

$$T_k^{\max}(L, 0) = \frac{Cv_{kp}\alpha}{\lambda v_q^2} \sqrt{\frac{\alpha}{\pi}} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{v_q \sqrt{Dt_{\text{ул}}}}{\alpha}\right) \right] \leq [T]. \quad (21)$$

Позволяет избежать образования шлифовочных прижогов и может послужить основой для проектирования циклов шлифования по тепловому критерию.

Обработку материалов и сплавов без шлифовочных трещин можно обеспечить, если ограничить формирующиеся в зоне интенсивного охлаждения напряжения предельными значениями:

$$\sigma_{\max}(x, \tau) = 2G \frac{1+\nu}{1-\nu} \alpha_t T_k \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha\tau}}\right) \leq [\sigma_{\text{лч}}]. \quad (22)$$

В случае доминирующего влияния наследственной неоднородности на интенсивность образования шлифовочных трещин, необходимо пользоваться критериями, в структуру которых входят детерминированные связи технологических параметров и свойства самих неоднородностей. В качестве таких можно использовать ограничение коэффициента интенсивности напряжений:

$$K = \frac{1}{\pi\sqrt{l}} \int_{-e}^e \sqrt{\frac{l+t}{l-t}} \{\sigma_x, \sigma_y\} dt \leq K_{Ic} \quad (23)$$

Или обеспечение с помощью управляющих технологических параметров предельного значения теплового потока, при котором сохраняется равновесие структурных дефектов:

$$q^* = \frac{P_z v_{kp} \alpha_s}{\sqrt{Dt_{\text{ул}}}} \leq \frac{\sqrt{3}\lambda K_{Ic}}{Hl\sqrt{\pi}\sigma}. \quad (24)$$

Условия бездефектного шлифования можно реализовать, используя информацию о структуре обрабатываемого материала. Так, в случае прерывающего характера структурных несовершенств длиной  $2l$ , их регулярного расположения относительно зоны контакта инструмента с деталью, можно в качестве критериального соотношения использовать условие равновесия дефекта в виде:

$$l_0 < \frac{K_C^2}{x[GT_k(1+\nu)\alpha_t]^C}. \quad (25)$$

В этой формуле технологическая часть содержится в связи величины контактной температуры  $T_k$  с условиями шлифования.

Приведенные неравенства дают увязку продольных характеристик температурного и силового полей с управляющими, технологическими параметрами. Они задают область сочетаний этих параметров, удовлетворяющих полученным термомеханическим критериям. При этом учитываются свойства обрабатываемого материала и гарантируются обеспечение требуемого качества изделий.

На основе полученных критериальных соотношений (18)-(25), построен алгоритм обеспечения качества поверхностного слоя деталей при шлифовании с учётом максимальной производительности обработки.

При проведении экспериментальных исследований температур шлифования сил резания, процесса микрорезания в зависимости от режимов обработки, конструкции применяемых кругов, использовались известные методики. Физико-механические свойства поверхностного слоя оценивались микротвердостью, величиной остаточных напряжений, вязкостью разрушения, металлографическими и фрактографическими исследованиями структурных изменений и характера разрушения, контролем на прижоги по технологии кислотного травления, магнитной и цветной дефектоскопией по выявлению шлифовочных трещин.

Трещиностойкость исследуемых материалов определялась на цилиндрических образцах с внешней осесимметрической кольцевой трещиной и прямоугольных образцах с боковым надрезом, удовлетворяющих существующим рекомендациям по испытаниям на вязкость разрушения. При испытаниях наблюдался разброс значений, однако коэффициент вариации для всех опытов не превышал 0,045.

В результате выполненных исследований решена научно-техническая проблема, состоящая в установлении расчетных зависимостей по определению влияния наследственных дефектов, сформированных от предшествующих операций на трещиностойкость поверхностного слоя при шлифовании и созданию оптимальных технологических условий обработки с учетом накопленных повреждений и неоднородностей материалов и сплавов, особо предрасположенных к трещинообразованию в процессе шлифования, что имеет важное народнохозяйственное значение для снижения брака на финишных операциях и повышения эксплуатационных свойств деталей машин.

### **Выводы**

Установлено, что шлифовочные трещины имеют тепловую природу, поэтому в качестве критериев бездефектной обработки необходимо выбирать тепловые критерии.



Разработана математическая модель, описывающая термомеханические процессы в поверхностном слое при шлифовании деталей из материалов и сплавов с учетом их неоднородностей, влияющих на формирование шлифовочных трещин. При этом впервые получены расчетные зависимости между критерием трещиностойкости и основными управляющими технологическими параметрами. По известным характеристикам наследственных дефектов определены предельные значения теплового потока обеспечивающие требуемое качество шлифуемых поверхностей.

### Литература

1. Якимов А.В. . Оптимизация процесса шлифования// А.В. Якимов / М., "Машиностроение", 1975 г.– 176 с.
2. Ящерицын П.И., Технологическая наследственность в машиностроении// П.И. Ящерицын, Э.В.Рыжов, В.И. Аверченков/ Мн., "Наука и техника", 1977 г.– 256 С
3. Усов А.В. Возникновение трещин при алмазно-абразивной обработке сталей//А.В. Усов, Г.Д. Григорьян/ Ж. "Сверхтвердые материалы", № 6, К., Наукова думка, 1982 г.–С.43 - 55 .
4. Усов А.В. .Причины появления дефектов при шлифовании магнитотвердых сплавов//А.В.Усов, Е.А.Кормилицына.,Ф.М. Сальковский /Ж. Технология электротехнического производства, вып. 4, 1982 г.–С. I -3 .
5. Усов А.В., Анализ условий возникновения шлифовочных трещин и пути их устранения// А.В. Усов, А.В.Якимов, Г.Д. Григорьян . / Ж. Вестник машиностроения № II, 1980 г.– С. 27 - 31 .
6. Евсеев Д.Г. Физические ОСНОВЫ процесса шлифования//Д.Г. Евсеев ., А.Н Сальников/ - Саратов: изд. Саратовского университета, 1978 г. – 128 с.
7. Худобин Л.В., Технология обработки высокоэффективных магнитных сплавов// Л.В., Худобин, А.И. Бударин , Ф.М. Сальковский /М., Энергия, 1979 г.– 184 с.
8. Попов Г.Я. Концентрация упругих напряжений возле штампов, разрезов, тонких включений и подкреплений//Г.Я. Попов - М.: Наука, 1982 - 344с
9. Подзей А.В., Шлифовочные дефекта и пути их устранения//А.В. Подзей А.В. Якимов/ Ж. "Вестник машиностроения", № 3, 1972 г.– 41 - 43 с.
10. Корчак С.Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей// С.Н.Корчак / "Машиностроение", М., 1974 г.– 260 с.
11. Бурнаков К.К., Причины трещинообразования при шлифовании./К.К., /Бурнаков ,Г.П. Мосталыгин /"Вестник машиностроения", № 9 1975 г.– С. 60 – 61.
12. Усов А.В. Влияние термомеханических напряжений на трещин образование при шлифовании цементируемых сплавов//А.В.Усов , А.В.Якимов , И.П. Сазонов/ Тез. докл. "Современные проблемы резания инструментами из сверх твердых материалов", Харьков, 1981 г.–С.57-61

*Надійшла до редакції 21.01.2015*